

1 036 MW 机组注入式定子接地保护调试及动作分析

兀鹏越¹, 陈飞文², 黄旭鹏², 秦 苓², 吴 斌², 张 杰³

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 华能海门电厂, 广东 汕头 050310;

3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 大型汽轮发电机较多地采用 2 套完全相同的“零序电压+3 次谐波”式定子接地保护, 某百万千瓦级机组采用了国产注入式定子接地保护, 实现了不同原理的保护双重化配置。阐述了注入式定子单相接地保护的原理, 详细介绍了机组的保护静态调试、发电机静止状态下的现场调试、发电机 30% 额定电压下的现场调试内容并给出实验数据。针对机组启动调试期间发生的机端软连接开裂导致的定子接地事故, 分析了该保护的实际行动情况, 指出了注入式定子接地的优点。

关键词: 百万千瓦; 定子接地保护; 调试

中图分类号: TM 77

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)03-0147-04

2009 年 6 月投产的华能海门电厂 1 号机组(简称海门 1 号机组)是南方电网运行的首台百万千瓦等级的燃煤机组, 发变组保护采用 RCS-985 微机成套保护装置, 这是该型号保护设备首次应用在百万千瓦级别的机组。与传统 2 套相同原理定子接地配置不同, 该装置采用 1 套“零序电压+3 次谐波”式定子接地保护和 1 套注入式定子接地保护, 实现了大机组定子接地不同原理的双重化配置。

目前, 国产注入式定子接地保护在大机组中的应用还比较少见, 该保护的设计、整定、调试都有一定的新颖之处。本文总结了该型注入式定子接地保护在海门 1 号机组的现场调试情况, 并对 1 号机组启动期间定子接地引起保护动作情况进行了分析, 供同型机组借鉴参考。

1 注入式定子接地保护的简介

1.1 海门 1 号机组简介及其定子接地保护

如图 1^{[1-2]①}所示, 1 号机组以发电机-变压器单元接线接入 500 kV 配电装置, 发电机经出口断路器与 1 号主变、1A 高厂变和 1B 高厂变相连。发电机中性点采用经接地变压器的高阻接地方式。

注入式定子接地保护是由 RCS-985U 低频注入电源装置和 RCS-985G 保护装置 2 部分组成。电源装置提供 20 Hz 低频电压信号经中性点接地变压器注入到发电机定子绕组中, 当发电机定子绕组发生接地时, 保护装置检测到注入的电压、电流信号发生变化, 通过计算低频电压、电流信号之间的关系, 可准确计算出接地故障电阻的阻值。海门 1 号机组参数如下^{②-⑤}: 发电机额定容量 1 036 MW, 发电机额定电压 27 kV, 定子对地电容 0.209 6 μF /相, 发电机出口断

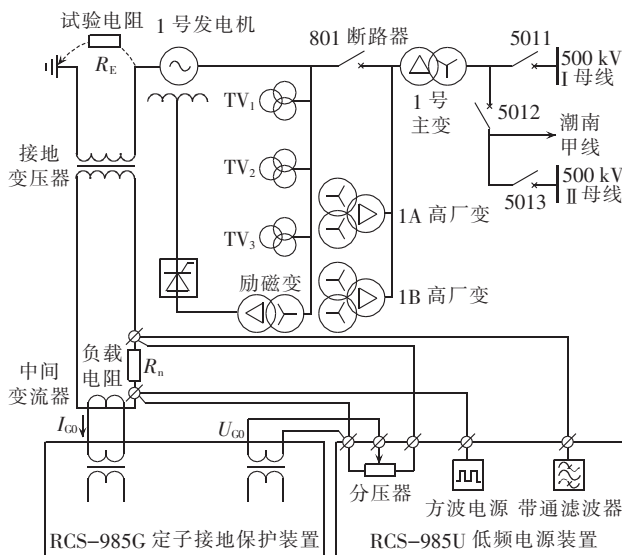


图 1 机组系统图及注入式定子接地保护接线

Fig.1 Wiring of voltage-injection stator grounding protection

路器、发电机侧电容 0.13 μF /相, 发电机出口断路器、主变侧电容 0.26 μF /相, 接地变压器容量 60 kV·A, 接地变压器电压变比 27/1.1, 负载电阻 1.45 Ω 。

1.2 保护原理^[3-5]

当发电机定子绕组对地绝缘正常时, 注入到定子绕组的低频电流主要是流过定子绕组对地电容的容性电流, 当对地绝缘老化或出现接地故障, 注入的电流将流过接地故障点(图 2 中箭头所示), 出现一部

- ① 南瑞继保电气有限公司. RCS-985 发电机注入式定子接地技术说明书(V1.00). 南京: 南瑞继保电气有限公司, 2007: 3-4.
- ② 东方电气股份有限公司. QFSN-1000-2-27 型汽轮发电机技术说明书, 2006.
- ③ 保定天威保变电气股份有限公司. SFP-720000/500 型变压器技术说明书, 2008.
- ④ ABB(香港)有限公司. HEC/8 型断路器安装运行维护说明书, 2008.
- ⑤ 昆山市特种变压器制造有限公司. DC-60/27 单相接地变压器技术说明书, 2007.

分电阻性电流。图 2 所示为等效的零序电路,图中, U_s 为注入式电源电压, $U_{I\text{F}0}$ 为注入的 20 Hz 零序电压, $I_{I\text{F}0}$ 为注入的 20 Hz 零序电流, R_{in} 为等效电源内阻, R_n 为变压器负载电阻, C_Σ 为发电机定子绕组侧系统对地电容(一相), R_E 为单相接地故障电阻。

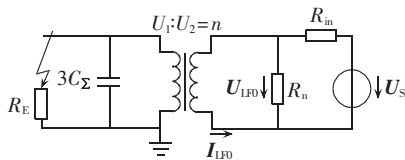


图 2 定子绕组单相接地故障等值电路
Fig.2 Equivalent circuit of stator single-phase grounding protection

由图 2,接地电阻一次值 R_E 可以由二次测量值 $R_{E,\text{sec}}$ 经以下公式算出:

$$R_E = K R_{E,\text{pri}} = K n^2 R_{E,\text{sec}}, \quad R_{E,\text{sec}} = \left[\text{Re} \left(\frac{I_{I\text{F}0}}{U_{I\text{F}0}} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

其中, K 是实际电阻 R_E 与一次测量电阻 $R_{E,\text{pri}}$ 之间的折算系数,由实际测量结果确定。

可见,保护装置检测注入的低频电压、电流,通过导纳法可准确计算出接地故障的过渡电阻阻值,计算的电阻阻值与定子绕组的接地故障位置无关,可以反映发电机 100% 的定子绕组单相接地,并且整个定子绕组各处具有相同的保护灵敏度,不受接地位置影响,无保护死区。该保护不受机组运行工况的影响,在发电机静止、启停过程、空载运行、并网运行等各种工况下均能可靠工作。

2 注入式定子接地保护调试

2.1 静态试验

静态试验内容主要是检验 RCS-985U 低频电源装置和 RCS-985G 保护装置的基本性能是否达到产品技术说明书里规定的技术要求,是在装置上电以后,且与系统未联接的情况下进行的。

a. 低频电源检查。将输出端开路,测得开路输出电压 28.9 V,用示波器观察输出电压为方波;将输出端短路,测得短路电流 3.08 A,表明电源有足够的短路电流输出能力。

b. 保护装置采样精度检查。用继电保护仪模拟输出 20 Hz 低频电压、电流信号,输入到 RCS-985G 保护装置的相应通道,然后检查其采样精度及线性度是否符合技术要求。

2.2 发电机静止状态现场试验^[6-7]

注入式定子接地保护定值与现场一次设备参数及安装方式紧密相关,靠事先计算误差很大,因此,注入式定子接地保护主要定值和参数都须现场试验获取。

发电机静止状态现场试验要求具备的条件是注入式定子接地保护二次系统已安装完成并且检查回路接线正确,整个电气一次系统安装完成,相关试验完毕,并且按照实际进行连接,即与发电机定子绕组

相联的设备都要连接上,包括出口断路器、1 号主变、1A 高厂变、1B 高厂变、励磁变、发电机 TV、中性点接地变等均需在实际运行状态,以保证定子绕组侧系统对地电容与实际工况一致。

2.2.1 实测补偿参数

a. 实测补偿相角。如图 2 所示,在正常状况下 $I_{I\text{F}0} = 3\omega C_\Sigma U_{I\text{F}0} / n^2$,为容性电流,其滞后注入电压 $U_{I\text{F}0}$ 的相位为 270° 。由于电压、电流回路的非线性及保护装置测量回路的相位延迟,保护装置的实测相角一般达不到 270° ,必须根据测量结果进行补偿。实测补偿相角结果见表 1。

表 1 补偿相角实测

Tab.1 Measured compensating angle (°)				
校正前相角		补偿相角		校正后相角
参考值	测量值	参考值	补偿值	
260	251	350	341	270

b. 实测补偿电阻。发电机静止状态下,将接地变压器高压侧短路,即模拟发电机中性点金属性接地故障,此时实际接地电阻为 $0\ \Omega$ 。由于接地变存在感性线圈和损耗电阻以及测量误差,导致保护装置的测量电阻、测量电抗均不为 $0\ \Omega$,因此,必须对电阻和电抗进行补偿。实测补偿电阻结果见表 2。

表 2 补偿电阻实测

Tab.2 Measured compensating resistance Ω				
测量电阻 二次值		测量电抗 二次值		补偿后电阻
参考值	测量值	参考值	测量值	
15	12.5	10	8	0.2

2.2.2 实测电源监视定值

外接电源式定子接地保护的正常工作完全依赖于外接低频电源的可靠工作,因此必须实时监测电源工作情况,当电源发生故障时立即报警。

发电机静止状态下,将接地变压器高压侧短路,即可得到最低的注入电压 $U_{\min}$,则“电压回路监视定值 U_{set} ”整定为 $U_{\text{set}} = K_{\text{rel}} U_{\min}$,其中可靠系数 K_{rel} 为 $0.4 \sim 0.7$ 。如果监测到电压低于此值,即认为出现电压互感器回路短路、开路,包括 RCS-985U 电源装置输出异常等问题,装置将会报警并闭锁出口。

发电机一次设备安装完成的情况下,将发电机出口断路器分断,发电机仅与励磁变相连接,发电机 TV、中性点 TV 等相关设备均在工作位置的情况下,投入低频电源,此时的电源电流即正常状态下的最小电流 $I_{\min}$,则“电流回路监视定值 I_{set} ”整定为 $I_{\text{set}} = K_{\text{rel}} I_{\min}$,其中可靠系数 K_{rel} 为 $0.4 \sim 0.7$ 。如果电流监测低于此值,即认为电流互感器回路出现短路、开路,包括 RCS-985U 电源装置输出异常等问题,装置也将会报警并闭锁出口。实测结果见表 3。

2.2.3 定子绕组单相接地静态模拟试验

由于测量误差、计算误差以及补偿系数误差等的

表 3 电源监视定值实测
Tab.3 Monitored power settings

短路状态			开路状态		
U_{min}/V	K_{nl}	U_{set}/V	I_{nl}/mA	K_{nl}	I_{set}/mA
0.25	0.5	0.13	0.38	0.7	0.26

存在,装置测出的接地电阻值与实际接地电阻值仍存在一定差距。根据实际试验结果发现,保护装置实测接地电阻的相对误差基本呈现单调增长的规律,因此可以引进一个折算系数 K 来消除此误差。

发电机静止状态下,如图 1 所示,在中性点与大地之间接入一个阻值与报警定值和跳闸定值接近的标准电阻 R_E ,读取保护装置对此电阻测量值 $R_{E_{pri}}$ (预设 $K=1$),再根据式(1)确定出 $K=R_{E_{pri}}/R_E$ 。由于海门 1 号机组报警定值 $1\text{ k}\Omega$,跳闸定值 $5\text{ k}\Omega$,因此选择标准校正电阻为两者的中间值 $R_E=(1\text{ k}\Omega+5\text{ k}\Omega)\div 2=3\text{ k}\Omega$,此时保护装置测量电阻一次值 $R_{E_{pri}}=0.682\text{ k}\Omega$,则 $K=R_{E_{pri}}/R_E=3\text{ k}\Omega/0.682\text{ k}\Omega=4.4$ 。在装置中整定新的 K 值为 4.4,然后用不同阻值的标准电阻校核保护装置测量精度,测试结果见表 4,测量误差符合技术说明书要求。调整 K 值重复测量直至合格。

表 4 定子绕组单相接地故障电阻测试($K=4.4$)
Tab.4 Measuring of fault resistance of stator
single-phase grounding($K=4.4$)

$R_E/\text{k}\Omega$	$R_{E_{pri}}/\text{k}\Omega$	$e/\%$
0.5	0.485	-3.00
1.0	0.961	-3.90
2.0	1.955	-2.25
3.0	3.004	0.13
5.0	5.130	2.60
6.0	6.287	4.78
7.0	7.336	4.81

注: e 为误差。

根据以上试验测得的实测参数对保护装置进行整定后,可以认为保护装置的各项参数已经与 1 号机组实际情况相匹配。

2.3 发电机 30 % 额定电压空载状态现场试验^[8]

理论上,发电机静止状态与发电机空载状态的接地电容是不变的,但是为了检验在实际状态下保护装置及低频电源装置的工作情况,实际模拟发电机定子接地,检验装置的动作情况。为安全起见,在发电机 30 % 额定电压情况下进行。

试验在发电机空载状态进行,缓慢升压至 8 kV ,在发电机中性点与大地之间接入大功率滑线电阻,改变滑线电阻阻值小于报警定值 $5.0\text{ k}\Omega$,保护装置发报警信号;继续改变滑线电阻阻值小于跳闸电阻定值 $1.0\text{ k}\Omega$,保护装置出口跳闸。

至此,所有试验结束,保护可以投入运行。

3 定子接地保护动作分析

3.1 故障现象

2009 年 6 月 22 日 17 时 47 分,在海门 1 号机组

的首次整套启动试验过程中,当机端电压升至额定电压运行不久,发电机跳闸。检查 DCS 信号及 1 号机组保护装置的動作报告,发现“零序电压 +3 次谐波”式定子接地保护和注入式定子接地保护几乎同时动作出口,跳开发电机及励磁开关。

保护动作故障录波如图 3 所示:发现发电机定子 C 相电压突然完全消失,同时 A、B 相电压上升为 100 V ,零序电压 58 V ,发电机中性点出现零序电流 13 A ,外接电源式定子接地保护显示接地电阻由 $3000\text{ k}\Omega$ 迅速下降为 $0\text{ k}\Omega$,以上故障持续延时达到定值 0.5 s 后保护跳闸,发电机机端电压消失,零序电压、零序电流均消失。当机组跳闸后,“零序电压+3 次谐波”式定子接地保护可以复归,但外加电源式定子接地保护仍可测得 C 相接地电阻为 $0\text{ k}\Omega$ 。

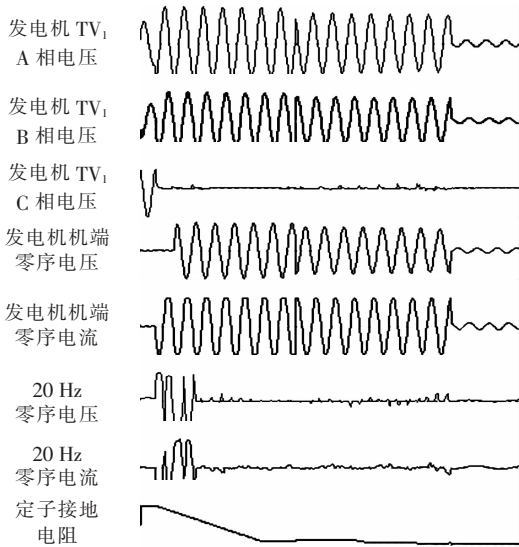


图 3 保护动作波形

Fig.3 Operating waveforms of protection

3.2 故障分析

小电流接地系统 C 相单相接地后,接地相对地电容 C_0 被短路,此时电流分布和电压、电流相位关系如图 4 所示^[9-10]。

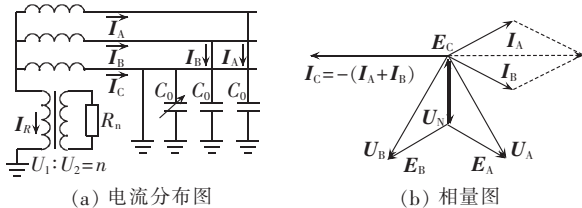


图 4 小电流接地系统 C 相接地
Fig.4 Phase-C grounding fault of
small-current grounding system

由图 4 可见,C 相接地后:

$$U_A=E_A-E_B=\sqrt{3}E_Be^{-j150^\circ}$$

$$U_B=E_B-E_A=\sqrt{3}E_Ae^{-j150^\circ}$$

$$U_C=0$$

中性点电压:

$$U_0=(U_A+U_B+U_C)/3=-E_C=U_N$$

即单相金属性接地时,故障相电压为 0,其他两

相电压上升为线电压,中性点电压上升为相电压。

C 相接地容性电流:

$$I_C = -(I_A + I_B) = (U_A + U_B) / (-jX_C)$$

其有效值为

$$I_C = 3U_{ph}\omega C_\Sigma$$

将 1.1 节中 1 号机组参数代入计算可得 $I_C = 3.08$ A。

C 相接地阻性电流:

$$I_R = U_{ph} / (n^2 R_n)$$

将 1.1 节中 1 号机组参数代入计算可得 $I_R = 17.84$ A。

则总的接地零序电流:

$$I_0 = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = 18.1$$
 A

与录波值 13 A 基本接近。

由以上分析可见,本次故障特征与发电机 C 相金属性接地特征基本一致。

3.3 故障处理

停机后打开发电机封母检查,发现发电机出口断路器 C 相与封母的软连接铜皮断裂翘起,与封母外壳内壁接触,且封母外壳内壁上有多个点白色放电痕迹。据此认定,发电机机端确实发生金属性一点接地故障,定子接地保护动作正确。

在这次机端单相接地事故中,首次应用于百万千瓦机组的外加电源式定子接地保护正确动作,说明其在大机组上的应用值得肯定。还需要说明的是,保护动作后的停机状态下,外加电源式定子接地保护仍可测量接地电阻大小,为检修人员进行故障分析、确定故障点提供了方便,极大地减少了故障处理时间。

4 结语

该保护在工程实际中的成功应用说明,国产注入式定子接地保护已能完全胜任大机组的接地保护,该保护与传统定子接地保护相比,具有不受机组运行工况的影响、无保护死区的突出优点,值得进一步推广,是大机组定子接地保护双重化的新选择。

参考文献:

- [1] 张琦雪,席康庆,陈佳胜,等. 大型发电机注入式定子接地保护的现场应用及分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):103-104.

ZHANG Qixue, XI Kangqing, CHEN Jiasheng, et al. Field application and analysis of the stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 103-104.

- [2] 兀鹏越,胡任亚,陈飞文,等. 1036 MW 机组的电气整套启动调试[J]. 电力建设,2010,31(7):103-104.
- [3] 李德佳,毕大强,王维俭. 大型发电机注入式定子单相接地保护的调试和运行[J]. 继电器,2004,32(16):51-56.
- [4] LI Dejia, BI Daqiang, WANG Weijian. Adjustment and operation of injection voltage scheme against the stator single-phase-to-ground fault of large generators[J]. Relay, 2004, 32(16): 51-56.
- [5] 王唯俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2002:111-113.
- [6] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社,1994:194-197.
- [7] 张琦雪,陈佳胜,陈俊,等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):67-68.
- [8] ZHANG Qixue, CHEN Jiasheng, CHEN Jun, et al. Improvement on criterions of stator earth fault protection with voltage injection for large-sized generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 67-68.
- [9] 唐云龙,赵斌,郭宝甫,等. 定子接地基波零压和 20 Hz 低阻保护的一些问题探讨[J]. 继电器,2007,35(12):79-80.
- [10] TANG Yunlong, ZHAO Bin, GUO Baofu, et al. The discussion of zero sequence voltage and 20 Hz low resistance protection for stator grounding fault[J]. Relay, 2007, 35(12): 79-80.
- [11] 张文斌,兀鹏越. 华能海门电厂 1 号机组(1036 MW)整套启动调试报告[R]. 西安:西安热工研究院有限公司,2009.
- [12] 国家电力调度通讯中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2002:10-11.
- [13] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京:中国电力出版社,2004:298-302.

(编辑:李玲)

作者简介:

兀鹏越(1976-),男,陕西蓝田人,工程师,硕士,从事电站启动调试技术研究工作(E-mail:wupengyue@tpri.com.cn);

陈飞文(1967-),男,广东潮阳人,工程师,从事发电厂电气检修及技术管理工作;

黄旭鹏(1974-),男,广东揭阳人,工程师,从事发电厂电气运行及技术管理工作;

秦苓(1971-),女,河南郑州人,工程师,从事发电厂电气检修及技术管理工作。

Commissioning and operational analysis of voltage-injection stator grounding protection for 1036 MW unit

WU Pengyue¹, CHEN Feiwen², HUANG Xupeng², QIN Ling², WU Bin², ZHANG Jie³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China;

2. Huaneng Haimen Power Plant, Shantou 050310, China;

3. NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Large steam turbine generator unit normally adopts two identical "zero-sequence voltage plus 3rd harmonic" type stator grounding protection. The domestic voltage-injection stator grounding protection is recently applied to a unit to realize the redundant configuration of protections with different principles. The basic principle of voltage-injection stator single-phase grounding protection is introduced, and its factory commissioning, site commissioning with inoperative generator and that with 30% rated voltage are detailed. The actual operating status for a stator grounding fault during unit startup commissioning is analyzed and its proper action shows the advantages of voltage-injection stator grounding protection.

Key words: million kilowatts; stator grounding protection; commissioning